Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
der Freien Universität Berlin
Direktor: Professor Dr. med. Dr. med. dent. Ewald Harndt

Ein Beitrag zur Methodik der Härtemessung am menschlichen Zahnschmelz unter Berücksichtigung seines strukturellen Aufbaus

INAUGURAL-DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Elke Baur
Forchtenberg

1968

Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin

Direktor: Professor Dr.med.Dr.med.dent. Ewald H a r n d t

Ein Beitrag zur Methodik der Härtemessung am menschlichen Zahnschmelz unter Berücksichtigung seines strukturellen Aufbaus

INAUGURAL - DISSERTATION
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
an der
Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
ELKE BAUR
Forchtenberg

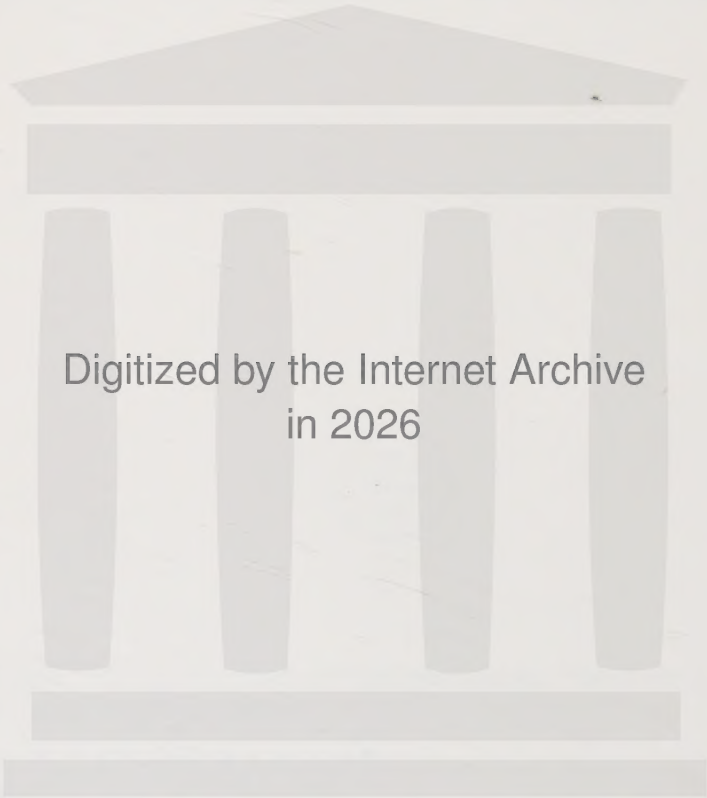
Dekan: Professor Dr.med. Hans Wolfgang S p i e r
Referent: Professor Dr.med.Dr.med.dent.
Ewald H a r n d t
Korreferent: Professor Dr.med.dent. Karl E i c h n er

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Freien Universität Berlin.

Promoviert am: 16. Mai 1968

Meinen Eltern


Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546510_0089

Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung	Seite 6
II.	Literaturübersicht	7
III.	Eigene Versuche	13
	1. Material und Methodik	13
	2. Statistische Auswertung	17
	3. Planung der Versuche	18
	4. Vorversuche mit Ergebnissen	19
	5. Hauptversuche	25
IV.	Ergebnisse der Hauptversuche	27
V.	Diskussion	35
VI.	Zusammenfassung	41
VII.	Abbildungen	42
VIII.	Literaturverzeichnis	46

I. Einleitung

Der Befund, daß nach einer Säurebehandlung oder bei einer beginnenden Karies der partiell entmineralisierte Schmelz geringere Härtewerte aufweist, hat dazu geführt, daß man mit Hilfe der physikalischen Methode der Härteprüfung Mineralisationseigenschaften des Schmelzes - vor allem Erscheinungen wie Remineralisation und Maturation - zu erfassen suchte.

Die dabei gewonnenen Ergebnisse waren jedoch nicht einheitlich. Die oft erheblich variierenden Werte konnten einerseits materialbedingt, andererseits methodisch bedingt sein, und es traten Zweifel auf, ob die Härteprüfung eine geeignete Methode sei, Aufschlüsse über den Mineralisationsgrad zu geben.

Da die Schwankungen der Härtewerte zum Teil innerhalb kleinster Bereiche des Schmelzes lagen, soll der Frage nachgegangen werden, w e l c h e F a k t o r e n die Messungen beeinflussen unter besonderer Berücksichtigung der S t r u k t u r u n t e r s c h i e d e im Schmelz.

II. Literaturübersicht

Die Härteprüfmethode ist eine physikalische Methode, die in der zahnärztlichen Wissenschaft schon sehr früh angewandt wurde, um den Aufbau der Zahnhartgewebe, vor allem Schmelz und Dentin, zu erforschen. Es erschien wichtig, Aufschlüsse über die Mineralisation und Struktur des Schmelzes zu erhalten, da diese zwei Punkte wichtige Faktoren der Kariesresistenz und der Kariesanfälligkeit darstellen.

Als einer der ersten hat sich HEAD (15) 1910 mit Härtemessungen am Schmelz beschäftigt. Er beobachtete, daß ein mit Säure behandelter Schmelz weicher wird, und daß nach einer Aufbewahrung in Speichel eine meßbare Wiedererhärtung eintritt.

Auch PICKERILL (36,37) hat sich schon früh mit Härteprüfungen befaßt. Seine zunächst empirische Einteilung der Zähne in

1. malakotische: weiche, weiße, kariesanfällige Zähne
2. sklerotische: gelbliche, harte, kariesresistente Zähne
3. native: sehr harte, fast kariesfreie Zähne der unzivilisierten Völker

hat er mit Hilfe von Ritzhärteprüfungen untermauert. Mit einem besonders konstruierten Härtemeßapparat, dem Sklerometer, fand er, daß native und sklerotische Zähne härter sind als malakotische. Ebenso wies er bei Zähnen, die mit Säure behandelt und anschließend in Speichel gelagert wurden, eine Wiedererhärtung nach.

Da die Säurewirkung einer Demineralisation entspricht, ließen die Ergebnisse von HEAD (15) und PICKERILL (36,37) den Schluß zu, daß Unterschiede der Härte durch Minerali-

sationsunterschiede bedingt seien, und diese mit Hilfe der Härteprüfung erfaßt werden könnten.

Auch der kariöse Angriff stellt - unter anderem - einen demineralisierenden Prozeß dar. Bei Untersuchungen von frühkariösen Defekten erhielt man erwartungsgemäß herabgesetzte Härtewerte (HODGE (19); CALDWELL (9); NEWBRUN et al. (35); BALLE (4)). Zu denselben Ergebnissen kam man bei Härtemessungen in entwicklungsbedingt hypomineralisierten Bereichen des Schmelzes, in den "white spots" und in den Schmelzbüscheln und Lamellen (GUSTAFSON und KLING (14); KOULOURIDES (21)).

Die Tatsache, daß eine künstlich erzeugte Entkalkung des Schmelzes bei Aufbewahrung des Zahnes in Speichel rückgängig gemacht werden kann, hat HEAD (15) und PICKERILL (36,37) dazu veranlaßt, das Wiedererhärten als eine Remineralisation aus dem Speichel zu deuten. Wie schon erwähnt fanden sie nach der Reminderalisation höhere Härtewerte. Auch die Ergebnisse anderer Autoren bestätigten ihre Annahme. So beobachtete ANDRESEN (1) an Weisheitszähnen, die infolge verzögerten Durchbruchs von Karies angegriffen waren, eine posteruptive Härtung. Die Untersuchungen von KOULOURIDES et al. (22), MÜHLEMANN et al. (34), PIGMAN et al. (38) und MEIER (31) zeigten, daß künstlich entkalkte Zähne eine Wiedererhärtung erfahren, wenn sie in einer "Wiedererhärtungslösung" gelagert werden. Auch bei kleinen mechanischen Schmelzläsionen ließ sich eine Wiederauffüllung der Defekte im Sinne einer reparativen Leistung beobachten (RHEINWALD und STAEHLE (41); WOLF und NEUWIRT (53); SCHLATTER (46)).

Aber nicht nur Erscheinungen wie die initiale Karies, entwicklungsbedingte Hypomineralisationen und die Re-

mineralisation versuchte man mit Hilfe der Härteprüfung zu erfassen, sondern man wollte mit dieser Methode auch die posteruptive Nachhärtung, also die Reifung oder Maturation beweisen.

PICKERILL (36,37) hat in Versuchen über das Eindringungsvermögen von $AgNO_3$ am Schmelz festgestellt, daß die Permeabilität bei Zähnen, die schon längere Zeit in der Mundhöhle gestanden hatten, geringer war als bei kurz vorher durchgebrochenen Zähnen. Da gleichzeitig durchgeführte Härtemessungen an den länger durchgebrochenen Zähnen höhere Werte ergaben - außerdem eine Zunahme der Dichte, eine Abnahme der Durchlässigkeit und Löslichkeit des Schmelzes zu beobachten waren - führte er diese Befunde auf eine Veränderung des Schmelzes durch den Einfluß des Speichels zurück. Er deutete das als Maturation, als posteruptive Reifung. Daraus ergab sich für ihn, daß die Härte des Schmelzes zum Teil eine Funktion der posteruptiven Reifung sei.

Neuere Untersuchungen über die Nachhärtung des Schmelzes mit dem Alter (WRIGHT und FENSKE (54) ; HERRMANN und ROZEIK (18); SCHIRBORT (45); RIEFENSTAHL (43)) bestätigten seine Befunde.

Auch das Vorhandensein einer härteren Außenschicht des Schmelzes wird von vielen Autoren als Folge eines posteruptiven Reifungsprozesses angesehen (PROELL und SCHUBERT (40); HODGE und MC KAY (20)). Besonders die Ergebnisse von AVERY (3) und HERRMANN und ROZEIK (18) scheinen dafür zu sprechen: eine härtere Außenschicht fehlte bei noch nicht durchgebrochenen Zähnen.

Daß man auch mit anderen Methoden, wie weichen Röntgen -

strahlen (TREWLIS (51)), Schmelzlöslichkeitsuntersuchungen (BRUDEVOLD (7); SWARTZ und PHILLIPS (50); SULLIVAN (49); SPEIRS (48)), markierten Isotopen (MEYERS et al.(32)), Färbungsmethoden (GATTING (13)) die Maturation nachweisen wollte und die Ergebnisse zum Teil mit den Resultaten von Härteprüfungen verglich, soll nur kurz angedeutet werden; die Härteprüfung blieb immer eine der bevorzugten Methoden.

Die genannten Ergebnisse, die für eine posteruptive Nachhärtung sprechen, stehen im Gegensatz zu den Angaben von GUSTAFSON und KLING (14). Sie fanden, daß die Härte in allen Schichten des Schmelzes ziemlich konstant ist. Ebenso konnten CALDWELL et al. (10) keine Unterschiede der Schmelzhärte bei Patienten verschiedenen Alters feststellen, während ATKINSON und SAUNSBURY (2) bei den Zähnen älterer Patienten sogar eine geringere Härte maßen. CRAIG und PEYTON (11) beobachteten überhaupt keine eindeutigen Tendenzen bei Härtemessungen, weil sie außerordentlich große Schwankungen der Werte erhielten.

KRÖNCKE (23) und KRÖNCKE und BUHLER (24) fanden bei Härteprüfungen an Zähnen zwar eine härtere Außenschicht des Schmelzes, konnten jedoch keine Unterschiede in den Härteverhältnissen zwischen retinierten und durchgebrochenen Zähnen feststellen. Daraus schlossen sie, daß der Befund einer härteren Außenschicht nicht als Folge eines Reifungs- oder Mineralisationsprozesses aus dem Speichel gedeutet werden könnte. Sie nahmen an, "daß diese Charakteristika mit dem Abschluß der regulären Schmelzentwicklung zustande kommen."

Die unterschiedlichen Ergebnisse bei den Mikrohärtemes-

sungen hatten zur Folge, daß man begann, sich über die Methode Gedanken zu machen. So wies MÜHLEMANN (33) darauf hin, daß eine Menge variabler Faktoren standardisiert werden müßten, um die Härte des Schmelzes zu bestimmen. Die Bedingungen sollten daher möglichst einheitlich gewählt werden, um die Werte der einzelnen Versuchsanordnungen miteinander vergleichen zu können.

Von den Autoren wurden im Laufe der Zeit verschiedenartige Vorrichtungen für die Härtemessungen benutzt. PICKERILL (36,37) arbeitete mit dem von ihm entwickelten Sklerometer nach dem Ritzverfahren. Auch PROELL und SCHUBERT (40) wandten das Ritzverfahren an, während RICHTER (42) das Brinellkugeldruckverfahren benutzte. Die neueren Untersuchungen wurden fast alle mit dem Pyramideneindringverfahren vorgenommen, wobei einige Autoren jedoch den Vickers-Diamanten (KRÖNCKE (23); SCHIRBORT (45); RIEFENSTAHL (43) u.a.), andere den Knoop-Diamanten (CALDWELL et al. (9,10); AVERY (3); PIGMAN et al. (38) u.a.) als Eindringkörper bevorzugten.

Daß eine Lagerung der Zähne in verschiedenen Lösungen die Schmelzhärte beeinflusse, ergaben die Untersuchungen von MÜHLEMANN (33) und RIEFENSTAHL (43). Richter (42) wies darauf hin, daß eine Austrocknung des Zahnes eine größere Härte mit sich bringe.

Die Änderung des Prüfgewichtes soll nach RYGE et al. (44) eine Änderung der Härtewerte bewirken. Er berichtete, daß mit einer Erhöhung der Prüflast die Härte zunehme, bis zu einem Maximum bei einem Prüfgewicht von etwa 50-100g . Schaut man die einzelnen Arbeiten in Hinblick auf die Prüflast an, so findet man, daß die verschiedenen

Autoren mit unterschiedlichem Prüfgewicht gearbeitet haben, angefangen von 25g bis 500g . In den meisten Fällen wurde jedoch eine Belastung von 100g oder 200g gewählt.

Einen Hinweis auf den Einfluß der Struktur findet man bei BURG (8), der feststellte, daß die Ebene senkrecht zu dem Prismenverlauf härter als die Ebene parallel zur Prismenrichtung sei. PROELL und SCHUBERT (40) und RICHTER (42) erhielten jedoch keine Unterschiede, während BORN (6) die Befunde BURGs (8) bestätigte. Die Härteuntersuchungen von GUSTAFSON und KLING (14) ergaben stellenweise auffallend niedrige Werte, für die die Autoren Schmelzbüschel verantwortlich machten. KRÖNCKE und BÜHLER (24) wiesen darauf hin, daß die verschiedenen Härtecharakteristika bedingt sein könnten durch die typischen Strukturunterschiede (Prismenverlauf, Schmelzbüschel und Lamellen) äußerer, innerer und cervikaler Schmelzabschnitte, und sie erhielten in Bereichen quergetroffener Schmelzprismen eine 10-20 %ig niedrigere Härte. LENZ et al. (28) deuteten an, daß die Bedingung für eine Verschiebung der einzelnen Kristalle gegeneinander unterschiedlich, und die Elastizitätsgrenze verschoben sein kann, ohne daß eine Anderung der Mineralisation vorliegen muß.

Da alle diese Befunde darauf hinweisen, daß die Schmelzhärte nicht nur abhängig ist vom Mineralisationsgrad, sondern eine Funktion vieler Faktoren darstellt, soll in den folgenden Versuchen gezeigt werden, welche Faktoren die Härtemessung beeinflussen unter besonderer Berücksichtigung der Struktur des Schmelzes. Dabei sollen unter Struktur nicht nur Mineralisationsunterschiede verstanden werden, sondern auch die Anordnung und der Verlauf der Prismen.

III. Eigene Versuche

1. Material und Methodik

Unter Härte versteht man nach der Definition von A. Martens (zitiert nach LUEGER (29)) den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines härteren Körpers entgegensetzt.

Zur Messung dieser Härte stehen sehr viele Methoden zur Verfügung. Die gebräuchlichsten in der Zahnheilkunde sind:

1. das Ritzverfahren, bei dem die Härte als Widerstand gegen das Ritzen durch feste Körper ermittelt wird, und die Ritzbreite ausgemessen wird (PICKERILL (36,37), RICHTER (42), PROELL und SCHUBERT (40) u.a.).
2. das Kugeleindruckverfahren nach Brinell, wobei der Durchmesser des Kugeleindrucks gemessen wird (RICHTER (42)).
3. das Pyramideneindringverfahren
   a) nach Vickers mit einer regelmäßig vierseitigen Diamantenpyramide (Öffnungswinkel 136°), bei dem die beiden Diagonalen ausgemessen werden (KRONCKE (23), SCHIRBORT (45), RIEFENSTAHL (43) u.a.)
   b) nach Knoop mit einer Diamantenpyramide von rautenförmigem Grundriß und den Öffnungswinkeln von 172°30' und 130°, bei dem nur die Längsdiagonale ausgemessen wird (CALDWELL et al. (9,10), AVERY (3), PIGMAN et al. (38) u.a.)

Die Mikrohärtemessungen bei den folgenden Versuchen wurden mit dem Kleinhärteprüfer Durimet der Firma Ernst Leitz GmbH Wetzlar vorgenommen. Als Eindringkörper wurde der Knoopdiamant gewählt, der sich wegen seines großen Winkels von $172^{\circ}30'$ im Gegensatz zum Vickersdiamanten mehr für die Härteprüfung oberflächlicherer Schichten eignet. Die Eindringtiefe verhält sich bei ihm zur langen Diagonalen wie 1 : 30, während beim Vickersdiamanten das Verhältnis 1 : 7 vorliegt. Bei gleicher Gewichtsbelastung ergeben sich 4-5 mal längere Eindrücke mit dem Knoopverfahren, was zu einer Steigerung der Meßgenauigkeit führt. Ein Längenunterschied von 1 μ würde in den Härtebereichen des Schmelzes (mit einem Prüfgewicht von 100g) beim Vickersverfahren zu einem Härteunterschied von ca. 30 Härtegraden führen, während es bei Verwendung des Knoopdiamanten nur zu einem Unterschied von ca. 10 Härtegraden kommt.

Bei Betätigung einer Auslösevorrichtung senkt sich die Diamantenpyramide unter einem bestimmten Prüfgewicht auf die Prüffläche. Die Sinkgeschwindigkeit, bzw. die Fallzeit, kann mit Hilfe einer Ölbremse reguliert werden. Nach dem Aufsetzen läßt man die Prüfkraft eine gewisse Zeit einwirken, dann wird der Diamant wieder abgehoben. Mit einer Meßskala im Okular des eingebauten Spezialmikroskops kann die Länge der großen Diagonalen abgemessen werden.

Aus der Formel $HK = 14{,}23 \cdot 10^3 \cdot P/l^2$

HK die Knoophärte in kg/mm^2
P die Prüfkraft in Gramm
l die Länge der großen Eindruckdiagonalen in μ

läßt sich die Härte durch Ausmessen der großen Diagonalen berechnen.

Nach den Angaben der Firma Leitz ergibt sich die Meßgenauigkeit aus dem Auflösungsvermögen der Optik und dem davon abhängigen kleinsten unvermeidlichen Einstellfehler. Dieser beträgt ± 0,2 µ, was bei einem Eindruck von 10 µ einem Meßfehler von 4% entspräche. Da die Knoopeindrücke im Bereich des Schmelzes jedoch etwa 65-70 µ lang sind, liegt die Fehlergrenze unter 1% .

Zur Verwendung kamen frisch extrahierte untere kariesfreie Weisheitszähne von 20-35jährigen Patienten. Sie wurden in Leguval K 25 der Firma Bayer eingebettet. Als Härterpaste wurde die Lucidolpaste B4 (mit dem Wirkstoff Benzoylperoxyd) der Firma Oxydo (Gesellschaft für chemische Produkte m.b.H., Emmerich/Rh.) verwendet. Mit Hilfe der Parallelschleifmaschine (von Dr. Steeg & Reuter, Bad Homburg v.d.H.) konnten 18 je 3 mm breite Parallelschliffe der Zähne in sagittaler Richtung von mesial nach distal angefertigt werden. Anschließend wurde mit einer waagrecht rotierenden feinkörnigen Sandsteinscheibe poliert. Die Endpolitur erfolgte am Polliermotor mit Bimsmehl und Schlemmkreide etwa 1-2 Minuten lang, wobei jede Wärmeentwicklung vermieden wurde. Bis zur weiterverarbeitung, die möglichst gleich anschließend erfolgte, wurden die Schliffe in einer Glycerin-Alkohol-Lösung (15 Teile Glycerin, 60 Teile 95%iger Alkohol , 25 Teile aqua dest.) aufbewahrt. Sie eignet sich erfahrungsgemäß gut für die Lagerung von Zähnen (LENZ (25); HELMCKE (16)) .

An dem eingebauten Spezialmikroskop des Durimet kann

zwar die Länge der Diagonalen genau abgemessen werden, die feineren Strukturunterschiede des Schmelzes können jedoch nicht erkannt werden, da bei auffallendem Licht die Strahlen, die die Oberfläche durchdringen, an den strukturellen Bestandteilen diffus gebeugt werden und so ein unklares Bild geben (WOLF (52)).

Deshalb wurden von der Oberfläche Adhäsionsreliefabdrücke genommen. Nach POHLMANN und VOLK (39) wurde Tylose C 10 der Firma Hoechst AG verwendet, bestehend aus Carboxymethylzellulose als wasserlösliches Matrizenmaterial. Tylose wurde mit 100 ccm aqua dest. aufgekocht, der Lösung einige Tropfen Wettinol als Netzmittel zugefügt, und anschließend das Ganze hochtourig zentrifugiert. Die Lösung wird auf die Schmelzoberfläche gebracht, und nach einigen Stunden kann sie, festgeworden, als Folie abgezogen werden. Zwischen einem Objektträger und einem Deckglas, fixiert mit Tesafilmstreifen, wird der Abdruck im durchfallenden Licht im Mikroskop betrachtet.

2. Statistische Auswertung

Die in den Versuchen ermittelten Werte (n=Anzahl der Messungen) sind dem Umfange nach begrenzt, sie sind Stichproben aller denkbar möglichen Werte.

Da die Unterschiede zwischen den Werten lediglich Ausdruck der Variabilität des Materials sein können, d.h. zufallsbedingt, muß mit Hilfe statistischer Methoden nachgeprüft werden, ob zwischen den verschiedenen Meßreihen ein signifikanter Unterschied besteht. Der einfache Mittelwert $\bar{x}$ ist nicht immer beweisend. Es müssen die Standardabweichung s (ein Maß für die Abweichung der Einzelwerte x von ihrem Durchschnitt $\bar{x}$) und der Standardfehler $s_{\bar{x}}$ (ein Maß für die Variabilität von Durchschnitten berechnet werden (MARTHALER (30)).

Die Standardabweichung erhält man aus der Formel :

$$s = \sqrt{\frac{Sx^2 - (Sx)^2/n}{n - 1}}$$

den Standardfehler aus der Formel :

$$s_{\bar{x}} = s/\sqrt{n}$$

Um zu vergleichen, ob zwei Meßreihen dem gleichen Kollektiv entstammen, wird mit Hilfe des t-Testes die Verläßlichkeit des Unterschiedes zwischen den beiden Meßreihen geprüft. Die Zufallswahrscheinlichkeit P kann bei entsprechender Anzahl von Freiheitsgraden und ermitteltem t-Wert in Tabellen abgelesen werden. Die Formel von t lautet :

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}$$

3. Planung der Versuche :

Man kann die Faktoren, die die Knoop-Härtemessungen beeinflussen, einteilen

A in solche, die wir nach eigenem Ermessen ändern können, die also streng methodisch bedingt sind

1. die Art der Aufbewahrung des Zahnes
2. das Prüfgewicht
3. die Fallzeitdauer des Diamanten
4. die Einwirkzeit des Diamanten

B in solche, die bedingt sind durch die speziellen strukturellen Eigenschaften des Schmelzes

1. den Mineralisationsgrad
2. die Beschaffenheit des Schmelzes nach verschieden intensiver Politur
3. den Verlauf der Prismen (senkrecht oder waagrecht zur Oberfläche)
4. den unterschiedlichen Winkel, den längslaufende Prismen mit der Längsachse des Knoopeindruckes bilden .

4. Vorversuche mit Ergebnissen

Die Abhängigkeit der gemessenen Härte von den methodisch bedingten Faktoren wurde in Vorversuchen untersucht.

A_1 die Art der Aufbewahrung des Zahnes :

Hierzu soll nur noch einmal auf die Ergebnisse von RICHTER (42) und auf die ausführlichen Untersuchungen von MÜHLEMANN (33) hingewiesen werden, weiter auf die Erfahrungen und Beobachtungen von HELMCKE (16) und LENZ (25) über die Glycerin-Alkohol-Lösung. Es sei erwähnt, daß eine Austrocknung des Untersuchungsmaterials streng vermieden wurde, und in den folgenden Versuchen auf Grund obiger Befunde die Zähne wie angegeben in der Glycerin-Alkohol-Lösung aufbewahrt wurden.

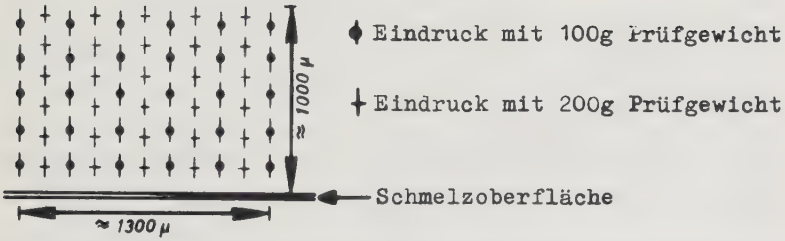
A_2 die Änderung des Prüfgewichts :

In drei Versuchsreihen wurden Messungen durchgeführt. Es sollen hier jedoch nur die Ergebnisse von Prüflasten mit 100g und 200g verglichen werden, da 50g-Gewichte zu kleine Eindrücke ergeben und so die Meßgenauigkeit stark herabsetzen, und Prüfgewichte über 200g schon zu große Eindrücke im Vergleich zur Schichtdicke des Schmelzes verursachen.

Versuchsreihe Ia

Im Bereich des okklusalen Schmelzes wurden mit 200g Prüfgewicht 6 Reihen mit je 5 Eindrücken und dazwischen mit 100g Prüfgewicht 5 Reihen mit je 6 Eindrücken in

folgender Anordnung gemacht :



Die große Diagonale des Knoopeindruckes stand senkrecht zur Oberfläche, als Fallzeit wurden 18 sec , als Einwirkzeit 12 sec gewählt.

Tabelle I zur Versuchsreihe Ia

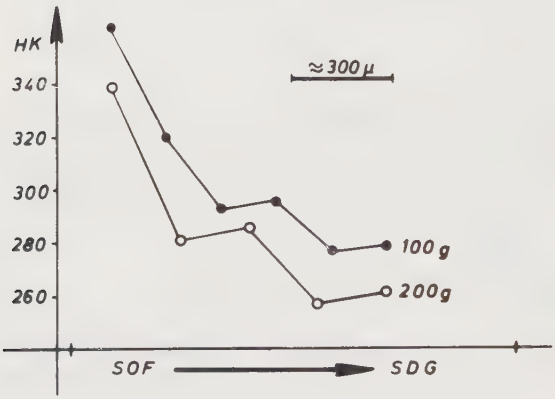
Prüfgewicht	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	p (%)
100 g	30	303	39,7	7,2		
200g	30	284	35,0	6,5	1,94	<10 >5

$\bar{x}$, s, $s_{\bar{x}}$ werden in Tabelle I und in den folgenden Tabellen in der Knoophärte HK, in kg/mm^2 , angegeben.

Von den Eindrücken, die etwa denselben Abstand von der Schmelzoberfläche hatten, wurde das arithmetische Mittel berechnet, und zwar für die 100g- und 200g-Werte getrennt. Bei der graphischen Darstellung dieser Mittelwerte ergibt sich folgende Kurve (siehe Seite 21 oben).

Wie man daraus ersieht, ist die Härte im Bereich der Schmelzoberfläche am größten und nimmt in Richtung Schmelz-dentingrenze ab. Dabei liegen jedoch die 200g-Werte eindeutig unter den 100g-Werten.

Graphische Darstellung I



SOF = Schmelzoberfläche

SDG = Schmelzdentingrenze

Wie in der Versuchsreihe Ia wurden in den Versuchsreihen Ib und Ic unter den gleichen Bedingungen Messungen mit den Prüfgewichten 100g und 200g gemacht.

Tabelle II zur Versuchsreihe Ib

Prüfgewicht	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
100g	41	296	19,7	3,1		
200g	45	276	21,3	3,2	4,47	<1

Tabelle III zur Versuchsreihe Ic

Prüfgewicht	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
100g	27	285	21,3	4,1		
200g	27	266	18,5	3,6	3,5	<1

Auch hier ist deutlich ersichtlich, daß die 200g-Werte

unter den 100g-Werten liegen, sogar mit einer größeren Signifikanz.

A_3 die Änderung der Fallzeit

In 3 Versuchsreihen wurden jeweils Messungen mit einer Fallzeit des Diamanten von 3 sec und 18 sec verglichen. Die übrigen Bedingungen wurden konstant gehalten, die Einwirkzeit betrug 12 sec , das Prüfgewicht 100g und die lange Diagonale des Knoopeindruckes stand senkrecht zur Schmelzoberfläche.

Tabelle IV zur Versuchsreihe IIa

Fallzeit	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
18 sec	30	302	27,3	4,9		
3 sec	30	275	23,4	4,3	4,1	<1

Tabelle V zur Versuchsreihe IIb

Fallzeit	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
18 sec	30	294	53,8	9,8		
3 sec	30	270	44,7	8,2	1,88	<10 >5

Tabelle VI zur Versuchsreihe IIc

Fallzeit	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
18 sec	22	303	35,6	7,6		
3 sec	22	281	30,4	6,5	2,11	<5 >2

Bei einer Fallzeit des Diamanten von 3 sec liegen größere Eindrücke (d.h. eine geringere Härte) vor. Diese Tatsache

könnte mit der größeren Energie des abfallenden Diamanten bei der höheren Geschwindigkeit erklärt werden.

A_4 Die Änderung der Einwirkzeit des Diamanten

Der Einfluss der Einwirkzeit des Diamanten auf den Schmelz wurde in 3 Versuchsreihen untersucht. Es wurden die Ergebnisse bei einer Einwirkzeit von 1-2 sec mit den Ergebnissen bei einer Einwirkzeit von 12 sec verglichen. Bei den Messungen betrug die Fallzeit des Diamanten 18 sec, das Prüfgewicht 100g, und die lange Diagonale des Knoopeindruckes stand senkrecht zur Schmelzoberfläche.

Tabelle VII zur Versuchsreihe IIIa

Einwirkzeit	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P	(%)
12 sec	30	304	25,6	4,7			
1-2 sec	30	317	27,0	4,9	2,02	~5	

Tabelle VIII zur Versuchsreihe IIIb

Einwirkzeit	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P	(%)
12 sec	28	269	22,6	4,3			
1-2 sec	30	294	45,2	8,2	2,4	<5	>2

Tabelle IX zur Versuchsreihe IIIc

Einwirkzeit	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P	(%)
12 sec	30	278	36,2	6,6			
1-2 sec	30	295	37,4	6,8	1,79	<10	>5

Bei einer Einwirkzeit von 1–2 sec erhält man kleinere Eindrücke, was einer größeren Härte entspricht. Man könnte sich diesen Befund damit erklären, daß bei der geringeren Einwirkzeit noch ein gewisses elastisches Rückstellvermögen des Schmelzes vorliegt, was zu kleineren Eindrücken führen würde.

Zusammenfassung der Vorversuche:

Für die Hauptversuche ergeben sich aus den Resultaten der Vorversuche:

Es müssen, was die veränderlichen Faktoren unter Punkt A anbetrifft, absolut konstante Bedingungen eingehalten werden. In den folgenden Hauptversuchen wurde mit einer Fallzeit des Diamanten von 18 sec , einer Einwirkzeit von 12 sec und mit einem Prüfgewicht von 100g gemessen. Da bei einer 100g-Belastung ausreichend große Eindrücke entstehen, wurde sie einer Prüflast von 200g vorgezogen, die im Vergleich mit der Mikrostruktur des Schmelzes zu große Eindrücke mit starken Schmelzsplitterungen am Rande verursacht.

5. Hauptversuche

Wie in der Planung der Versuche auf S. 18 unter Punkt B aufgeführt wird, soll hier gezeigt werden, inwieweit die strukturellen Eigenschaften der angeschliffenen und polierten Schmelzoberfläche die Härtemessungen beeinflussen.

Zur Ergänzung wurden auch Messungen in einem hypomineralisierten Gebiet, in einer makroskopisch sichtbaren kreidigen Verfärbung, vorgenommen. Damit soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß auch der Mineralisationsgrad die Härte beeinflußt.

Der Hauptaugenmerk wurde jedoch auf die Untersuchungen der eigentlich strukturbedingten Einflüsse gerichtet.

Es wurden folgende Versuchsreihen ausgeführt:

I. Versuchsreihe:

Härtemessungen in einer kreidigen Verfärbung
a) im Zentrum der Verfärbung
b) am Rande der Verfärbung

II. Versuchsreihe:

Messungen auf verschieden intensiv polierten Oberflächen
(Die langen Diagonalen der Knoopeindrücke verliefen senkrecht zur Schmelzoberfläche)
a) nach der üblichen Politur (s.Methodik) wurde an einer markierten Stelle im okklusalen Bereich des Schmelzes gemessen.

b) An derselben markierten Stelle erfolgten die Messungen nach einer zweiten intensiven Politur. Am Poliermotor wurde mit Bimsmehl so lange poliert, bis die Eindrücke von a) verschwunden waren. Daraufhin wurde 3-4 Minuten lang mit Schlemmkreide nachpoliert, um eine Oberfläche mit möglichst wenigen und nicht tiefen Kratzern zu erhalten.

III. Versuchsreihe:

Messungen im Bereich der Hunter-Schregerschen Streifen (die langen Diagonalen der Knoopeindrücke verliefen senkrecht zur Schmelzoberfläche)
a) in den Diazonien
b) in den Parazonien

IV. Versuchsreihe :

Messungen im Bereich längsverlaufender Prismen, bei denen die lange Diagonale des Knoopeindruckes
a) senkrecht
b) parallel zu den längsverlaufenden Prismen steht.

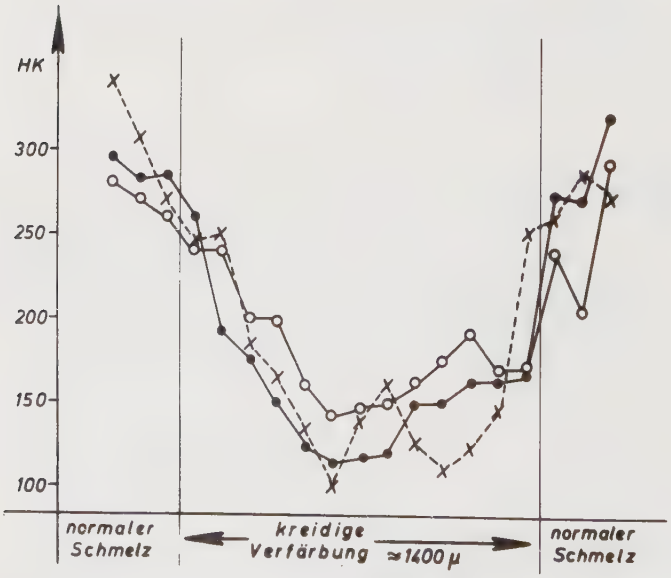
IV. Ergebnisse der Hauptversuche

1. Ergebnisse der Härtemessungen in einer kreidigen Verfärbung:

Tabelle X zur Versuchsreihe 1

	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
a) im Zentrum	54	192	50,7	7,4		
b) am Rande	10	287	23,1	7,3	6,99	<1

Die graphische Darstellung II zeigt den Härteverlauf von 3 Meßreihen durch das hypomineralisierte Gebiet.



Die stark erniedrigten Härtewerte im Zentrum der kreidigen Verfärbung sind deutlich zu erkennen.

2. Ergebnisse der Härtemessungen auf verschieden intensiv polierten Oberflächen:

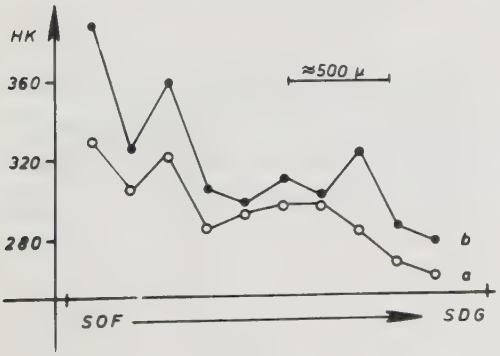
Tabelle XI zur Versuchsreihe IIa

	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
a) Politur	40	292	30,3	4,8		
b) Politur +	40	315	41,2	6,5	2,84	<1

Politur + = 2. intensive Politur

In der Versuchsanordnung, die der Tabelle XI zugrunde liegt, wurden je 4 Reihen mit Messungen vor und nach der intensiven 2. Politur von der Schmelzoberfläche in Richtung Schmelzdentingrenze gemacht. Von den jeweils 4 Eindrücken, die denselben Abstand zur Schmelzoberfläche hatten, wurde ähnlich der auf Seite 20 beschriebenen Anordnung der arithmetische Mittelwert berechnet. Der Verlauf der Mittelwerte ist in der graphischen Darstellung III ersichtlich. Man erkennt die Tendenz, daß die Härte in Richtung Schmelzdentingrenze abnimmt, und daß nach einer intensiven Nachpolitur die Werte an derselben Stelle höher liegen.

Graphische Darstellung III



a: nach normaler Politur

b: nach 2. intensiver Politur

Tabelle XII zur Versuchsreihe IIb

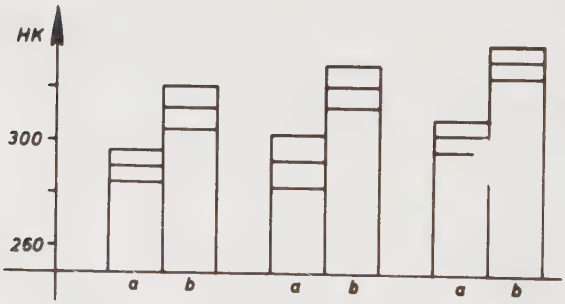
	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
a) Politur	30	294	45,9	8,9		
b) Politur +	30	321	38,2	6,9	2,38	~2

Tabelle XIII zur Versuchsreihe IIc

	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
a) Politur	30	302	27,3	5,0		
b) Politur +	30	330	30,2	5,4	3,7	<1

Die graphische Darstellung IV zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Tabellen XI, XII und XIII mit dem mittleren Fehler des Durchschnitts.

Graphische Darstellung IV



a: nach normaler Politur

b: nach 2. intensiver Politur

In den Versuchsreihen IIa, IIb und IIc konnte gezeigt werden, daß durch einen intensiven Poliervorgang eine Veränderung des oberflächlich gelegenen Schmelzes eintritt, die höhere Härtewerte zur Folge hat.

3. Ergebnisse der Härtemessungen in den Hunter-Schregerschen Streifen:

Tabelle XIV zur Versuchsreihe IIIa

	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
Diazonie	28	317	45,1	8,5		
Parazonie	28	273	30,6	5,6	3,85	<1

Aus den Werten, die der Tabelle XIV zugrunde liegen, wurden 2 Reihen mit 8 und 10 Messungen herausgegriffen. Beide Reihen verlaufen nebeneinander von der Schmelzoberfläche zur Schmelzdentingrenze, Reihe 1 (n=10) in einer Diazonie, Reihe 2 (n=8) in einer Parazonie. Man erkennt bei beiden die Abnahme der Härte in Nähe der Schmelzdentingrenze, gleichzeitig aber, daß die Härtewerte in der Diazonie höher liegen als in der Parazonie.

Graphische Darstellung V

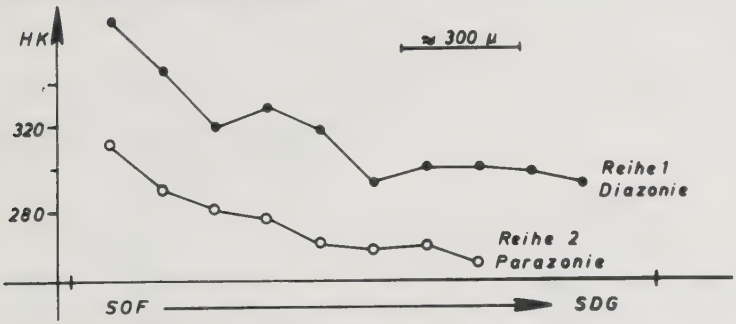


Tabelle XV zur Versuchsreihe IIIb

	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
Diazonie	30	320	52,7	9,6		
Parazonie	30	263	34,5	6,3	4,95	<1

Tabelle XVI zur Versuchsreihe IIIc

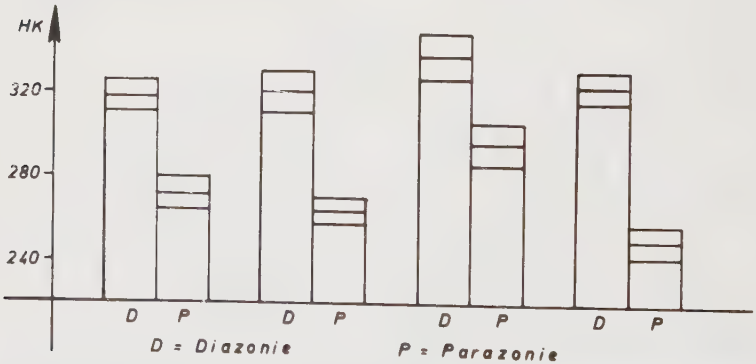
	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
Diazonie	30	337	61,2	11,2		
Parazonie	30	295	57,3	10,4	2,74	<1

Tabelle XVII zur Versuchsreihe IIId

	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
Diazonie	26	322	37,1	7,3		
Parazonie	26	250	23,8	4,7	8,34	<1

Die graphische Darstellung VI zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Tabellen XIV - XVII mit dem mittleren Fehler des Durchschnitts.

Graphische Darstellung VI



In den Versuchsreihen IIIa - IIId konnte nachgewiesen werden, daß der Verlauf der Prismen die Härtewerte signifikant beeinflußt .

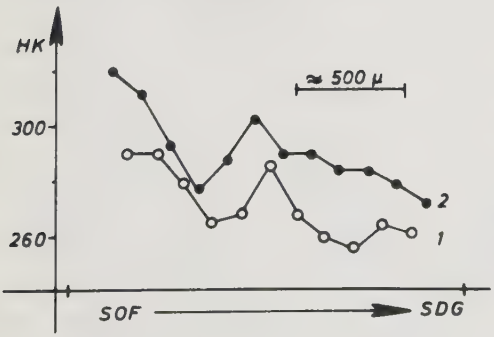
4. Ergebnisse der Messungen, bei denen die lange Diagonale des Knoopeindruckes senkrecht und parallel zu längsverlaufenden Prismen steht :

Tabelle XVIII zur Versuchsreihe IVa

Diagonale	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
senkrecht	44	272	26,3	4,0		
parallel	48	291	29,4	4,3	3,04	<1

Die den Tabellen zugrunde liegenden Messungen wurden in 4 Reihen gemacht, bei denen die lange Diagonale des Knoopeindruckes abwechselnd senkrecht und parallel zu den längsverlaufenden Prismen stand (entsprechend der Anordnung in Abb.6). Von den Eindrücken, die denselben Abstand zur Schmelzoberfläche hatten, wurde der arithmetische Mittelwert berechnet. Der Verlauf der Mittelwerte von der Schmelzoberfläche zur Schmelzdentingrenze ist in der graphischen Darstellung VII ersichtlich und zwar getrennt nach der Richtung der Eindrücke.

Graphische Darstellung VII



Reihe 1: lange Diagonale senkrecht zur Prismenrichtung

Reihe 2: lange Diagonale parallel zur Prismenrichtung

Tabelle XIX zur Versuchsreihe IV b

Diagonale	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
senkrecht	27	296	43,9	8,4		
parallel	29	318	42,1	7,8	3,48	<1

Tabelle XX zur Versuchsreihe IVc

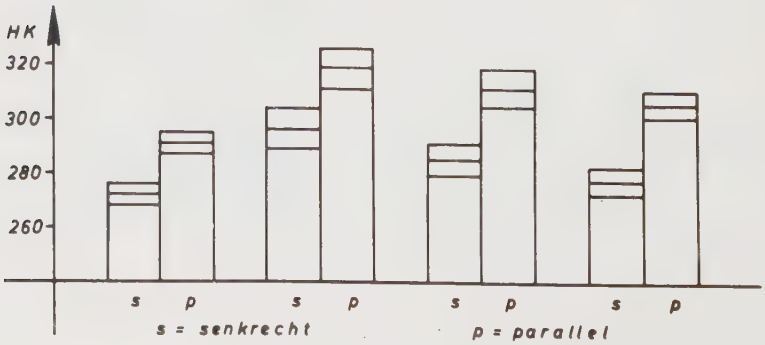
Diagonale	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
senkrecht	33	285	20,3	5,7		
parallel	33	311	38,1	6,6	3,34	<1

Tabelle XXI zur Versuchsreihe IVd

Diagonale	n	$\bar{x}$	s	$s_{\bar{x}}$	t	P (%)
senkrecht	53	277	35,2	4,8		
parallel	55	305	39,8	5,4	3,88	<1

Die graphische Darstellung VIII zeigt die arithmetischen Mittelwerte der Tabellen IVa - IVd mit dem mittleren Fehler des Durchschnitts.

Graphische Darstellung VIII



In den Versuchsreihen IVa - IVd konnte gezeigt werden, daß Messungen, bei denen die lange Diagonale des Knoopeindruckes senkrecht zu längsverlaufenden Prismen steht, erniedrigte Härtewerte ergeben.

V. Diskussion

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß die gemessenen Härtewerte von einer Vielzahl von Faktoren abhängen, die einmal methodisch bedingt sind, aber auch vom Untersuchungsmaterial beeinflußt werden. Um Härtewerte vergleichen zu können, müssen - wie in den Vorversuchen gezeigt wurde - konstante Bedingungen eingehalten werden, dasselbe Verfahren angewandt und gleichteitig der, wenn auch geringe, Meßfehler von ca. 1 % berücksichtigt werden.

Auch bei den Hauptversuchen der vorliegenden Arbeit, in denen einheitliche Bedingungen gewählt wurden, finden sich große Standardabweichungen. Sie lassen darauf schließen, daß für die Streuungen hauptsächlich das Untersuchungsmaterial, also der Schmelz, verantwortlich ist.

Bekanntlich ist der Schmelz kein homogenes Gebilde, sondern besitzt einen bestimmten strukturellen Aufbau. Schon BURG (8), BORN (6), GUSTAFSON und KLING (14) und KRÖNCKE und BÜHLER (24) versuchten, Härteschwankungen auf strukturelle Eigenschaften zurückzuführen, indem sie lichtmikroskopisch erkennbare Erscheinungen wie Prismenverlauf, Schmelzbüschel und Lamellen für die Abweichungen verantwortlich machten. Daß der Verlauf der Prismen einen Einfluß auf die Meßwerte hat, konnte bestätigt werden.

Doch auch bei Messungen innerhalb einheitlicher Strukturen, also in Bereichen mit entweder quergetroffenen Prismen (Diazonien) oder längsgetroffenen Prismen (Parazonien), fanden sich die großen Standardabweichungen.

Es kann also nicht allein die lichtmikroskopisch sichtbare Struktur als Ursache in Frage kommen. Für die Deutung der Ergebnisse müssen die neueren elektronenmikroskopischen Erkenntnisse über den ultrastrukturellen Aufbau des Schmelzes herangezogen werden.

In den letzten 15 Jahren haben elektronenmikroskopische Untersuchungen (SCOTT und WYCKOFF (47); HELMCKE (16,17); LENZ (26)) gezeigt, daß der Schmelz ein mikrokristallines Gebilde darstellt, bestehend aus organischer Matrix und Einkristallen von etwa 500-1000 mμ Länge und 5-10 mμ Breite. Bei der Mineralisation bilden sich in der organischen Matrix Kristallkeime, die sich mit ihrer Längsachse entlang der Proteinfibrillen orientieren. Durch Flächenwachstum der Kristallkeime entsteht im Laufe der Entwicklung ein festes kompaktes Gefüge. Bei hypomineralisierten Gebieten ist dieses Wachstum nicht vollständig, es bleiben Lücken zurück, während es bei Demineralisationserscheinungen durch Flächenabbau an den Kristallen zu einer sekundären Gefügeauflockerung kommt.

Man kann also Mineralisationserscheinungen nicht streng von dem strukturellen Aufbau trennen, im Gegenteil, eine Änderung des Mineralisationsgrades führt immer zu einer Änderung der Struktur und umgekehrt.

Das Bild der Prismen ergibt sich erst sekundär aus der Verteilung und Orientierung der submikroskopischen Bauelemente, aus ihrer fiederartigen Anordnung. Die Kristalle benachbarter Prismen sind unmittelbar miteinander verzahnt - eine interprismatische Substanz als gesondertes Gebilde ist elektronenmikroskopisch nicht zu erkennen.

Bei der Härteprüfung wird weniger die Härte der Einzelkristalle bestimmt, sondern das Ergebnis ist abhängig von der Struktur des Gesamtaggregates, d.h. von der quantitativen Verteilung der Bauelemente, ihrer Orientierung, ihrer Dichte, den vorhandenen Lücken und dem Inhalt dieser Lücken (LENZ (27)).

Auf Grund der Kenntnisse der Ultrastruktur des Schmelzes ergeben sich für die Eindrücke bei der Härteprüfung Konsequenzen in statisch-mechanischer Hinsicht. Man kann sich vorstellen, daß beim Eindringen des Diamanten die Schmelzoberfläche zunächst elastisch verformt wird, wobei sich die Kristalle gegeneinander verschieben.

In einem hypomineralisierten Gebiet mit dem aufgelockerten Gefüge ist diese Verschiebung leichter möglich, wie die Ergebnisse dieser Arbeit erneut bestätigen (vgl. HODGE (19); CALDWELL et al. (9); NEWBRUN et al. (35); BALLE (4)).

Bei der Überschreitung der Elastizitätsgrenze tritt eine Beschädigung der Kristalle auf. Die dabei auf die winzigen Flächen der einzelnen Kristalle wirkenden Drucke können so groß sein, daß es zu einem "quasi-viskösen Fließen" kommt (BERLIN (5)), und sich im Bereich des Eindruckes eine Reyleigh-Beilby-Schicht ähnliche Struktur bildet. Unter Reyleigh-Beilby-Schicht versteht man eine glatt aussehende Schicht bei Metallen, die an bearbeiteten Stellen auftritt. Man stellt sich vor, daß unter dem Druck des bearbeitenden Gerätes das Metall plastisch wird, wodurch die oberflächlichen Unebenheiten verschwinden.

Betrachtet man die Abbildungen 3 und 5, so sieht man, daß in der Tiefe der Eindrücke sämtliche Strukturen ausgelöscht sind.

Auch bei der Politur kann der Druck pro Kristall sehr groß werden (nach LENZ et al.(28) bis zu den Größenordnungen von $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5$ atü) und zu einem quasiviskösen Fließen ausreichen. Die polierte Schmelzoberfläche dürfte sich daher in ihrer Struktur von den darunterliegenden Schichten unterscheiden. Wie groß der Einfluß der Politur ist, konnte in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden, indem gezeigt wurde, daß eine zweite intensive Politur zu einer Steigerung der Härte führt (Abb. 1, 2, 3).

Daß Messungen mit 100g Belastung größere Härtewerte ergeben als Messungen mit 200g Belastung scheint ebenfalls für eine durch die Politur härter gewordene Oberflächenschicht zu sprechen. Je kleiner nämlich die Prüfkraft gewählt wird, um so kleiner werden die Eindrücke, und um so mehr werden nur die oberflächlicheren Schichten gemessen, während man mit einem größeren Prüfgewicht mehr die Härte des Materialinnern erfaßt.

Aus den Ergebnissen ist weiterhin ersichtlich, daß die gemessene Härte auch abhängig von dem Winkel ist, mit dem die lange Diagonale des Knoopdiamanten längsverlaufende Prismen trifft. Bei einem Winkel von 180°, also bei parallelem Verlauf, bedeckt der Eindruck nur ein bis zwei Prismen, während bei einem Winkel von 90°, also bei senkrechtem Verlauf, der Eindruck über mehrere Prismen hinweggeht.

Rein theoretisch (wenn man z.B. das Schmelzgefüge mit einer Holzfaserung vergleicht) wäre zu erwarten, daß bei der parallel verlaufenden langen Diagonalen des Diamanten ein größerer Eindruck entsteht als bei einem senkrecht verlaufenden Eindruck. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch das Gegenteil.

Eine Erklärung für diesen Befund findet man, wenn man zusätzlich zu den gemessenen Werten die mit Hilfe der Reliefabdruckmethode hergestellten Bilder betrachtet und dabei besonders sein Augenmerk auf die Veränderungen des Schmelzes am Rande dieser Eindrücke richtet. Trifft nämlich die lange Diagonale senkrecht zu den Prismen auf, dann kommt es im Gegensatz zu den parallelen Eindrücken in den meisten Fällen zum Wegsplittern der Randpartien (s. Abb. 6, 7, 8).

Durch das Wegsplittern des Schmelzes bei den senkrechten Eindrücken wird die Auflagefläche für den Diamanten geringer, was nach der Definition Druck = Kraft/Fläche zu einem größeren Druck auf die verbleibenden Teile führt. Der Diamant kann weiter eindringen und damit einen größeren Eindruck verursachen, was einer geringeren Härte entspricht.

Abschließend kann gesagt werden, daß die Härteprüfmethode mit dem Knoopdiamanten eine außerordentlich empfindliche Methode darstellt. Es muß allerdings betont werden, daß weniger die Härte des Einzelkristalles, als die der Gesamtstruktur bestimmt wird.

Bei der Deutung der Ergebnisse sollte berücksichtigt wer-

den, daß viele Faktoren die Messungen am Schmelz beeinflussen. Zwar lassen sich die methodischen Faktoren auf eine Mindestzahl beschränken, aber die vom Untersuchungsmaterial - dem Schmelz - abhängigen Faktoren geben immer noch erhebliche Schwankungen. Diese können zum Teil erklärt werden, indem man durch die Adhäsionsreliefmethode die lichtmikroskopisch erkennbaren Strukturen erfaßt und sie mit den gemessenen Werten vergleicht. Eine statistische Auswertung der Messungen ist wegen der großen Schwankungen unbedingt erforderlich.

VI. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit sollte gezeigt werden, welche Faktoren die Knoophärtemessungen am Schmelz menschlicher Zähne beeinflussen unter besonderer Berücksichtigung des strukturellen Aufbaus des Schmelzes.

In den Vorversuchen wurde festgestellt, daß methodisch bedingte Faktoren wie :

1. Fallzeit des Diamanten
2. Einwirkzeit des Diamanten
3. Prüflast

die Ergebnisse verändern können und daß daher immer unter einheitlichen Bedingungen gearbeitet werden muß, um Messungen auszuwerten und zu vergleichen.

In den Hauptversuchen konnte nachgewiesen werden, wie bedeutend der Strukturfaktor ist. Eigenschaften des Schmelzes wie :

1. Mineralisationsgrad
2. Verlauf der Prismen
3. Zustand der Oberfläche in Abhängigkeit von der Politur
4. der unterschiedlichen Winkel, den längsverlaufende Prismen mit der Längsachse des Knoopeindruckes bilden,

beeinflussen die Härtewerte signifikant.

VII. Abbildungen

Abb. 1: Härtemeßeindrücke am Schmelz, die unter den Standardbedingungen vor der intensiven zweiten Politur gemacht wurden. Auf der kratzerlosen Oberfläche erkennt man deutlich die leicht schräggetroffenen Prismen. Während die meisten Eindrücke eine glatte Begrenzung zeigen, haben einige Eindrücke starke Splitterungen des Schmelzes verursacht.
Vergrößerung 80 : 1

Abb. 2: Ausschnitt aus Abb. 1
Vergrößerung 320 : 1

Abb. 3: Meßeindrücke nach zweiter intensiver Politur. Die Struktur des Schmelzes ist nur noch andeutungsweise zu erkennen.
Vergrößerung 360 : 1

Abb. 4: Härtemeßeindrücke im Bereich der Hunter-Schregerschen Streifen .
Vergrößerung 100 : 1

Abb. 1

Abb. 2

Abb. 3

Abb. 4

Abb. 5: Ausschnitt aus Abb. 4. Im Bereich des Eindruckes sind die Strukturen ausgelöscht.
Vergrößerung 340 : 1

Abb. 6: Härtemeßeindrücke, bei denen die lange Diagonale des Knoopdiamanten die längsverlaufenden Prismen senkrecht und parallel trifft. Man erkennt deutlich, daß bei senkrecht verlaufenden Diagonalen starke Schmelzsplitterungen am Rande des Eindruckes auftreten.
Vergrößerung 113 : 1

Abb. 7: Eindrücke aus derselben Versuchsreihe.
Vergrößerung 240 : 1

Abb. 8: Ausschnitt aus Abb. 6.
Vergrößerung 240 : 1

Abb. 5

Abb. 6

Abb. 7

Abb. 8

VIII. Literaturverzeichnis

1. Andresen, V.: Über Mineralisation und Remineralisation des Zahnschmelzes. Dtsch.Mschr.Zahnhk. 39,4, (1921)

2. Atkinson, H.F. and P. Saunsbury: An Investigation into the Hardness of Human Enamel. Brit. Dent. J.94, 249 (1953)

3. Avery, J.K.: Microradiographic and Microhardness Studies of Developing Enamel. in: Proc. of the 9th Orca Congress Pergamon Press Oxford, London. p. 245 (1963)

4. Balle, D.: Mikrohärtemessungen im gesunden und kariösen Milchzahnschmelz. Med. Diss. Tübingen 1963

5. Berlin, V.: Elektronenmikroskopische Untersuchungen mechanischer und chemischer Verletzungen des Schmelzes. in: Verhandlungen der 6. Tagung der Europäischen Arbeitsgemeinschaft für Fluorforschung und Zahnkariesprophylaxe 1959 in Pavia. Edition de la Clinique Dentaire de Pavia l'Université de Pavia Orca 1962 S. 207

6. Born, J.: Untersuchungen menschlicher und tierischer Zähne mit Hilfe des Ritzverfahrens zur Feststellung ihrer Härte und ihres strukturellen Aufbaus.
Med. Diss. Bonn 1938

7. Brudevold, F.: A Study of the Phosphate Solubility of the Human Enamel Surface.
J. Dent. Res. 27, 320 (1938)

8. Burg, F.: Neue spezielle Härtebestimmungen der Hartsubstanzen des Zahnes
Med. Diss. Halle 1921

9. Caldwell, R.C., R.W. Gilmore, P. Timberlake, J. Pigman and W. Pigman:
Semiquantitative Studies of in Vitro Caries by Microhardness Tests.
J. Dent. Res. 37, 301 (1958)

10. Caldwell, R.C., M.L. Muntz, R.W. Gilmore and W. Pigman:
Microhardness Studies of Intact Surface Enamel.
J. Dent. Res. 36, 732 (1957)

11. Craig, R.G. and F.A. Peyton :
The Microhardness of Enamel and Dentin.
J.Dent. Res. 37, 661 (1958)

12. Frank, R.M.: Conceptions nouvelles concernant l'email et sa genese. Arch. Oral Biol. Special Supplement 4, 29 (1961)

13. Gatting, E.: Untersuchungen über die exogene posteruptive Mineralisation des menschlichen Zahnschmelzes. Med. Diss. FU Berlin 1952

14. Gustafson, G. and O. Kling: Microhardness Measurements in the Human Dental Enamel. Odont. Tskr. 56, 24 (1948)

15. Head, J.: Enamel Softening and Rehardening as a Factor in Erosion. Dent. Cosmos 52, 46 (1910)

16. Helmcke, J.G.: Atlas des menschlichen Zahnes im elektronenmikroskopischen Bild. I. Teil: Histologie des normalen Zahnes Transmare Photo Berlin 1953

17. Helmcke, J.G.: Elektronenmikroskopische Strukturuntersuchungen an gesunden und pathologischen Zähnen. Schweiz. Mschr. Zahnhk. 65, 629 (1955)

18. Herrmann, M. und F. Rozeik:
Über die Schmelzreife.
Zahnärztl. Welt / Reform 63, 425 (1962)

19. Hodge, H.C.: The Microhardness of Sound and Carious Teeth.
J. Dent. Res. 18, 265 (1939)

20. Hodge, H.C. and H. Mc Kay:
The Microhardness of Teeth.
J.Amer.Dent.Ass. 20, 227 (1933)

21. Koulourides, T.: Remineralisation of Enamel and Dentin.
Dent. Clin. N. America July 1962
p. 485

22. Koulorides, T., H. Cueto, J. Reed, M.S. Kim and W. Pigman:
Studies on Rehardening of Artificially Softened Enamel .
J. Dent. Res. 40, 698 (Abstr.) (1961)

23. Kröncke, A.: Oberflächenlöslichkeit und Mikrohärte des Zahnschmelzes verlagerter menschlicher Zähne.
in: Advances in Fluorine Research and Dental Caries Prevention
Volume 3, p. 119
Edited for Orca (1965)

24. Kröncke, A. und C. Bühler:
Exogene Schmelzreifung im Lichte experimenteller Untersuchungen.
Dtsch. Zahnärztl.Zschr. 20, 596 (1965)

25. Lenz, H.:
Elektronenmikroskopische Untersuchungen über Strukturen des normalen Dentins und deren Veränderungen durch Karieseinwirkung.
Med.Diss. FU Berlin 1955

26. Lenz, H.:
Elektronenmikroskopische Untersuchungen der Mineralisation des Zahnschmelzes und der beginnenden Karies.
Arch. Oral Biol. Special Supplement 4, 34 (1961)

27. Lenz, H.:
Die Bedeutung der Elektronenmikroskopie für die Kariesforschung.
Zahnärztl. Rdsch. 76, 188 (1967)

28. Lenz, H., K. Rossinsky und H.R. Mühlemann :
Elektronenoptische Studien der Oberfläche und der Tiefen des initialen künstlichen White Spot.
Schweiz. Mschr. Zahnhk. 74, 654, (1964)

29. Lueger:
Lexikon der Technik
Band 3: Werkstoffe und Werkstoffprüfung. S. 291
Herausgegeben von Wellinger, K.

und E. Krägeloh
Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart
1961

30. Marthaler, T.: Biostatische Anleitung.
Zahnärztl. Rdsch. 66, Jahrg.(1957)
Beiblatt: Zahnärztl. Student.
Rundschau 15, Jahrg. S. 11 und S. 13

31. Meier, H.: Das Verhalten der Härte vorentkalkten Schmelzes unter dem Einfluß einiger Fluoride und Phosphate.
Med. Diss. Zürich und Tübingen 1964

32. Meyers, H.M., J.G. Hamilton and. H. Becks:
A Tracer Study of the Transfer of F^{18} to Teeth by Topical Application.
J.Dent. Res. 31, 743 (1952)

33. Mühlemann, H.R.: Storage Medium and Enamel Hardness.
Helv. odontol. Acta 8, 41 (1964)

34. Mühlemann, H.R., H. Lenz and K. Rossinsky:
Electron Microscopic Appearance of Rehardened Enamel.
Helv. odont. Acta 8, 108 (1964)

35. Newbrun, W. P. Timberlake and W. Pigman:
Changes in Microhardness of Enamel Following Treatment with Lactate Buffer.
J. Dent. Res. 38, 293 (1959)

36. Pickerill, H.P.: The Prevention of Dental Caries and Oral Sepsis.
Dent. Cosmos 54, 479 (1912)

37. Pickerill, H.P.: The Structure of Enamel.
Dent. Cosmos 55, 969 (1913)

38. Pigman, W., H. Cueto and D. Baugh:
Conditions Affecting the Rehardening of Softened Enamel.
J. Dent. Res. 43, 1187 (1964)

39. Pohlmann, G. und O.H. Volk:
Tylose, ein wasserlösliches Abdruckmaterial für Oberflächenuntersuchungen.
Z. wiss. Mikr. 64, 252 (1959)
und 65, 118 (1961)

40. Proell, F.W. und Schubert:
Die Ritzhärte des Schmelzes.
Zschr. Stomat, 26, 1047 (1928)

41. Rheinwald, U. und G. Staehle:
Untersuchungen zur Frage der Remineralisation des Zahnschmelzes.
Stoma, Konstanz 4, 259 (1949)

42. Richter, H.: Über Ritz- und Kugeldruckhärte der harten Zahnsubstanzen, ein kritischer Vergleich.
Zschr. Stomat. 29, 591 (1939)

43. Riefenstahl, P.: Härtemessungen an Zähnen von Menschen verschiedenen Alters. Med. Diss. FU Berlin 1966

44. Ryge, G., D.E. Foley and C.W. Fairhurst: Micro-Indentation Hardness. J. Dent. Res. 40, 1116 (1961)

45. Schirbort, K.: Physikalische Untersuchungen über die Nachhärtung des menschlichen Zahnschmelzes. Med. Diss. FU Berlin 1963

46. Schlatter, P.: Untersuchungen der Remineralisation mechanischer Schmelzläsionen. Med.Diss. Zürich 1962

47. Scott, D.B.: The Study of Enamel by Electron Microscopy. J. Amer. Dent. Ass. 44, 377 (1952)

48. Speirs, R.L.: The Nature of Surface Enamel. Brit. Dent. J. 20, 209 (1959)

49. Sullivan, H.R.: The Solubility of Enamel Surface. J. Dent. Res. 33, 504 (1954)

50. Swartz, M.L. and R.W. Phillips: Solubility of Enamel on Areas of Known Hardness. J. Dent. Res. 31, 293 (1952)

51. Thewlis, J.: X-Ray Examination of Human Teeth. Brit. Dent. J. 57, 457 (1934)

52. Wolf, J.: Plastische Histologie der Zahngewebe. Dtsch. Zahn-, Mund- und Kieferhk. 7, 265, 507, 678 (1940)

53. Wolf, J. und F. Neuwirt: Reparative Vorgänge an der Oberfläche der natürlichen und künstlich hervorgerufenen Schmelzdefekte. Dtsch. Zahn-, Mund- und Kieferhk. 8, 222, 349 (1941)

54. Wright, H.N. and E.L. Fenske: Factors Involved in Variability in Hardness of Tooth Structure. J. Dent. Res. 17, 297 (Abstr.) (1938)

Herrn Professor Dr. med., Dr. med. dent. E. Harndt möchte ich an dieser Stelle meinen Dank für die Uberlassung des Themas aussprechen.

Herrn Dr. H. Lenz danke ich herzlich für die Anregungen und die freundliche Unterstützung bei der Ausarbeitung des Themas.

Lebenslauf

Als Tochter des Zahnarztes Dr. Karl Baur und seiner Ehefrau Liesel, geb. Ehrmann, wurde ich, Elke Baur, am 12. 9. 1941 in Forchtenberg geboren.

Von 1948 bis 1952 besuchte ich dort die Volksschule und von 1952 bis 1961 das Gymnasium in Künzelsau, wo ich am 14. 3. 1961 die Reifeprüfung ablegte.

Ab Wintersemester 1961/62 studierte ich an der Universität Heidelberg Zahnmedizin. Im Sommersemester 1964 immatrikulierte ich mich an der Freien Universität Berlin. Nach bestandener Zahnärztlicher Prüfung erhielt ich am 20. März 1967 die Bestallung als Zahnärztin.